

УДК 621.92

**В.Б. Богуцкий, ст. преподаватель,**

**С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук,**

**А.А. Ярошенко, профессор, д-р физ.-мат. наук**

*Севастопольский национальный технический университет,*

*Ул. Университетская, 33, г. Севастополь,*

*tm@sevntu.com.ua*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ШЛИФОВАНИЯ И ЗАТОЧКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ПРОТЯЖЕК**

*Проведен анализа зоны контакта шлифовального круга с заготовкой в условиях, когда ось вращения круга расположена под некоторым углом к оси вращения заготовки. Выполнен анализ зон контакта при наличии угла скрещивания осей круга и заготовки для случаев шлифования периферией и боковой поверхностью круга на примере операции шлифования и заточки зубьев протяжки. Получены математические зависимости позволяющие определить текущее значение глубины микрорезания и могут быть использованы при расчетах величины размерного износа шлифовальных кругов.*

**Ключевые слова:** *шлифование, зона контакта, абразивное зерно, эквивалентный диаметр, микрорезание, съём материала.*

**Введение.** Обзор литературных источников [1,2, и др.] показывает, что одной из наиболее сложных и трудоемких операций при производстве инструмента, является операция шлифования стружечных канавок и задних поверхностей таких инструментов, как протяжек, цилиндрических и модульных фрез. Обработка таких поверхностей, например стружечных канавок протяжки, выполняется профильным абразивным инструментом, износ которого в значительной степени определяет вероятность возникновения прижогов и, как следствие, ускоренный выход из строя дорогостоящего инструмента. Поэтому исследование закономерностей износа абразивного инструмента и создание математической модели процесса с целью аналитического расчета величины слоя снимаемого при правке, является актуальной задачей.

**Целью данной статьи** является анализ взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой при шлифовании со скрещенными в одной плоскости осями и разработка математической модели процессов шлифования и заточки поверхностей зубьев протяжек.

**Основное содержание работы.** При шлифовании материал удаляется с обрабатываемой поверхности в зоне контакта заготовки с кругом, которая представляет собой область взаимного проникновения абразивных зерен круга в материал заготовки и гребешков материала в промежутки между вершинами абразивных зерен.

К параметрам состояния зоны контакта относятся её размеры и форма, соотношение удаленной и не удаленной частей материала в каждой области зоны, физические процессы формообразования в том числе: стружкообразования, тепловыделения, пластических деформаций обрабатываемого материала, износа и разрушения инструментального материала, физического и химического воздействия на компоненты СОТС.

К выходным переменным зоны относятся силы резания, параметры теплового потока, поля поверхностей резания и поля вторичных процессов, скорость износа абразивного материала и ряд других переменных [8].

Распределение тепловых потоков, физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов в зоне контакта, процессы стружкообразования достаточно полно рассмотрены в работах [4, 5, и др.]. Изучение взаимодействия инструмента и заготовки при шлифовании рекомендуется выполнять, предварительно выдвинув гипотезу о форме единичных срезов. Однако, форма единичных срезов относится к выходным переменным подсистемы зоны контакта и изучать закономерности процесса обработки на основе анализа формы срезов не представляется возможным. Более целесообразно можно говорить о форме зоны контакта заготовки с инструментом, параметры которой относятся к параметрам состояния рассматриваемой подсистемы.

При заточке зубьев фасонного режущего инструмента ось вращения шлифовального круга расположена под некоторым углом к оси вращения заготовки, например, при шлифовании стружечных канавок и заточки по передней поверхности зубьев круглой внутренней протяжки (рисунок 1).

При выполнении технологической операции шлифовальному кругу (рисунок 2) диаметром  $D$ , высотой  $T$ , углом наклона задней поверхности круга  $\alpha^*$ , с периферийной поверхностью заправленной радиусом  $r_c$ , установленному на шпиндель станка под углом  $\delta$  к оси вращения заготовки, сообщают

вращательное движение с окружной скоростью  $V_k=20...25$  м/с [2]. Обрабатываемую заготовку устанавливают в центрах передней и задней бабок станка и приводят во вращение со скоростью  $V_u=0,15...0,25$  м/с. После включения вращения заготовки и круга, шлифовальной бабке, для шлифования стружечной канавки периферией круга, сообщают поперечную подачу  $S_y$  (см. рисунок 3, а). Для затачивания зуба протяжки по передней поверхности заготовке сообщают продольную подачу  $S_x$  (см. рисунок 3, б).

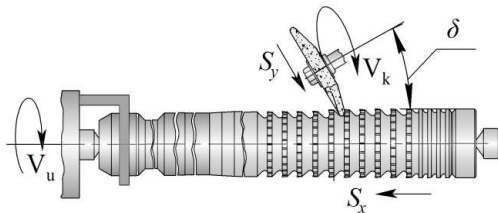


Рисунок 1 – Схема круглого наружного шлифования канавок и заточки по передней поверхности зубьев круглой протяжки

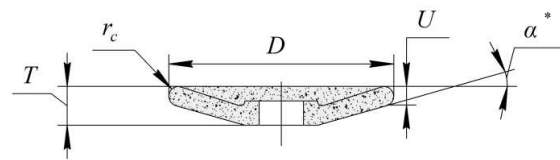


Рисунок 2 – Круг шлифовальный тарельчатый тип 12 ГОСТ Р 52781-2007

При сближении шлифовального круга и заготовки вследствие упругих отжатий, в технологической системе появляется радиальное (или осевое) давление инструмента на поверхность заготовки и возникает упругопластический контакт. Под действием сил абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал до тех пор, пока упругие силы технологической системы не будут уравновешены суммарной нормальной реакцией [7]. Величина действующих сил определяет максимально возможную глубину микрорезания единичными абразивными зёрнами и геометрические параметры зоны контакта.

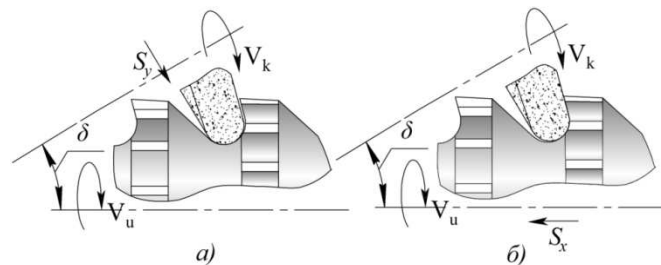


Рисунок 3 – Схема шлифования: а) – стружечной канавки; б) – заточки протяжки по передней поверхности.

Выполним анализ зоны контакта поверхности заготовки и абразивных зёрен, расположенных на профилированной периферии круга. Как показано в [9], в тех случаях, когда оси вращения обрабатываемой заготовки и шлифовального круга расположены в одной плоскости, но находятся под некоторым углом друг к другу, целесообразно выполнять проекцию шлифуемой поверхности детали на плоскость перпендикулярную оси вращения шлифовального круга (см. рисунок 4). Тогда, согласно схемы, приведенной на рисунке 4, процесс можно рассматривать как круглое наружное врезное шлифование, а размер шлифуемой поверхности детали в рассматриваемой плоскости равен:  $d'_1 = d_1 / \cos \delta = 2r'_1$ .

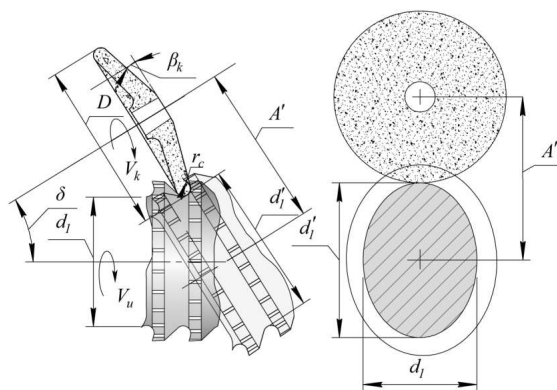


Рисунок 4 – Схема проекции шлифуемой поверхности детали на плоскость перпендикулярную оси вращения шлифовального круга

Если бы материал при шлифовании не срезался и абразивный круг не изнашивался, то в плоскости, перпендикулярной оси шлифовального круга, зона контакта для процесса круглого наружного врезного шлифования имела бы форму двух сегментов с общей хордой (сегменты  $ABC$  и  $CDA$  см. рисунок 5).

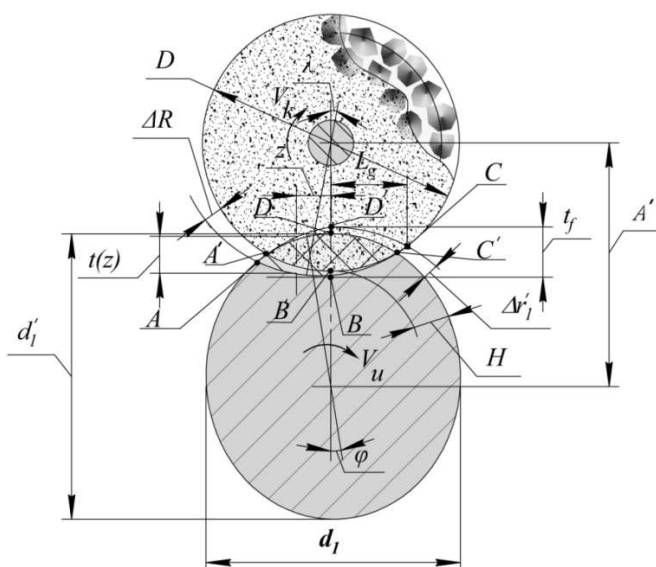


Рисунок 5 – Схема - зоны контакта заготовки с периферийной поверхностью шлифовального круга при круглом наружном шлифовании в случае расположения оси круга под углом к оси заготовки

При вращении заготовки обрабатываемая поверхность встречалась бы с абразивными зернами, наиболее удаленными от центра вращения круга, в точке  $A$ . Контакт материала с зернами прерывался бы в точке  $C$ . Однако, вследствие наличия микрорезания после выхода из зоны контакта, радиус заготовки уменьшается на величину радиального съема материала  $\Delta r_1'$ . На поверхности остается слой шероховатости поверхности  $H$  (граничная область материал-среда). Радиус круга в зоне контакта уменьшается на величину износа  $\Delta R$ . Изменения размеров заготовки и круга приводят к изменению формы самой зоны. Обрабатываемая поверхность встречается с абразивными зернами, наиболее удаленными от центра его вращения, не в точке  $A$ , а в точке  $A'$ , процесс микрорезания заканчивается не в точке  $C$ , а в точке  $C'$ . С учетом радиального съема материала и износа круга зона контакта будет иметь форму двух криволинейных сегментов, сегмент  $A'B'C'$  и сегмент  $C'D'A'$  (рисунок 6).

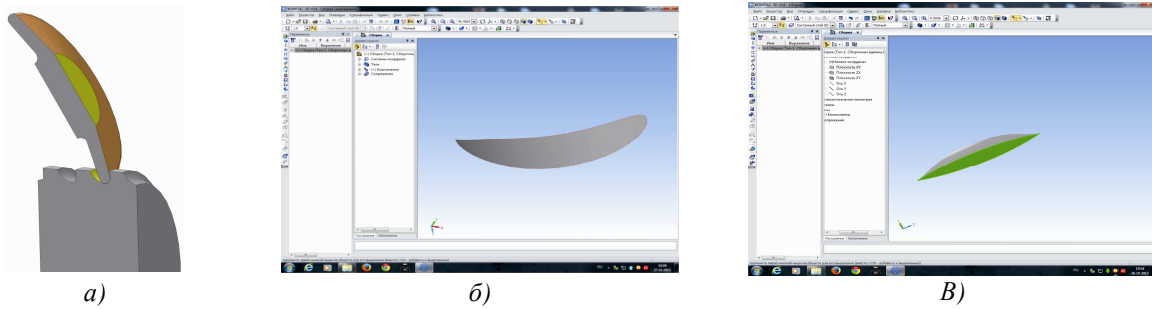


Рисунок 6 – Пример моделирования зоны контакта круга и заготовки при шлифовании стружечных канавок протяжек: а) 3D модель контакта шлифовального круга и обрабатываемой заготовки; б) поверхность контакта круга и стружечной канавки; в) зона контакта

С уменьшением радиального съема материала линия  $C'D'A$  приближается к линии  $CDA$  [3] с его увеличением зона приобретает запятообразную форму. Форма зоны будет меняться и за счет возникновения упругих деформаций круга и заготовки. Упругие деформации уменьшают глубину микрорезания единичными абразивными зёрнами. Под действием сил, возникающих при микрорезании, абразивные зёрна утапливаются в связку инструмента, линия, ограничивающая зону контакта со стороны материала, будет смещаться к центру вращения круга. Значительное влияние упругих свойств инструмента подтверждается экспериментальными исследованиями [6 и др.]. Так как положение линии  $A'D'C'$  зоны контакта определяется условиями выполнения процесса шлифования, то за начало отчета необходимо брать дугу  $ADC$ , которая соответствует траектории движения наиболее выступающих вершин исходной шероховатости. Положение линии  $A'D'C'$  вычисляется аналитически. Аналогично со стороны инструмента за начало отчета необходимо брать дугу  $ABC$ , координаты линии  $A'B'C'$  определяются также аналитически.

Если принять в качестве допущения незначительность влияния на размеры зоны температурных и упругих деформаций материалов круга и заготовки, то максимально возможная глубина вычислится как

$$t_f = H + \Delta r_1', \tag{1}$$

где  $H$  – слой, в котором распределена шероховатость поверхности после касания данного участка заготовки с кругом.

Данные, приведенные в [7] показывают, что ни одним из слагаемых уравнения (1) нельзя пренебречь при разработке динамической модели процесса.

Максимальная глубина резания соответствует глубине внедрения в материал абразивных зёрен, наиболее удаленных от центра вращения круга. При движении вершины зёрна в зоне от точки  $C$  (см. рисунок 5) она увеличивается, становится максимальной, а затем начинает уменьшаться.

Текущее значение глубины микрорезания  $t(z)$  зависит от радиус-векторов заготовки  $r_1'$ , круга  $R$ , угла наклона оси круга  $\delta$  и межцентрового расстояния  $A'$  (см. рисунок 5). Для наиболее выступающих зёрен оно может быть определено по уравнению

$$t(z) = R \cos \lambda + r_1' \cos \phi - A', \tag{2}$$

где  $\lambda$  – угол между радиус-вектором поверхности круга и основной плоскостью;  $\phi$  – угол между радиус-вектором поверхности заготовки и основной плоскостью.

Принимая во внимание, что  $\cos \phi = \sqrt{1 - \sin^2 \phi}$ ;  $\sin \phi \approx \frac{z}{r_1'}$ ;

$\cos \lambda = \sqrt{1 - \frac{(r_1')^2}{R^2} \sin^2 \phi}$ ;  $A = R + r_1' - t_f$  после преобразований получим

$$t(z) = R \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} + r_1' \sqrt{1 - \left(\frac{z}{r_1'}\right)^2} - (R + r_1' - t_f), \tag{3}$$

где  $z$  – расстояние сечения заготовки до основной плоскости.

Так как для реальных процессов шлифования величина  $z$  в пределах зоны контакта более чем на порядок меньше  $R$  и  $r_1'$ , подкоренные выражения уравнения (3) могут быть представлены в виде степенных рядов

$$\sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} = \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{z^2}{R^2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \frac{z^4}{R^4} - \dots \right) \cong 1 - \frac{z^2}{2R^2}; \quad \sqrt{1 - \frac{z^2}{(r_1')^2}} = \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{z^2}{(r_1')^2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \frac{z^4}{(r_1')^4} - \dots \right) \cong 1 - \frac{z^2}{2(r_1')^2} \quad (4)$$

Учитывая уравнения (3, 4) и заменив радиусы круга и заготовки на соответствующие диаметры  $D$  и  $d_1'$  получим

$$t(z) = t_f - \frac{z^2}{D_e} \quad (5)$$

Для этих условий эквивалентный диаметр  $D_e$  (в случае шлифования стружечных канавок протяжки) определяется выражением:

$$D_e = \frac{D_k d_1 \cos \delta}{D_k \cos \delta + d_1} \quad (6)$$

Заточка передней поверхности внутренних протяжек должен осуществляться конической поверхностью круга тарельчатой формы, так как передняя поверхность внутренних протяжек является конической, то при положительном переднем угле  $\gamma$  необходимо, чтобы шлифовальный круг «вписывался» в размеры канавки. Для анализа зоны контакта поверхности заготовки и абразивных зерен, расположенных на конической поверхности круга (см. рисунок 3, б) выполним сечение зоны контакта в плоскости, расположенной перпендикулярно обрабатываемой поверхности (рисунок 8, сечение А-А).

На основе рисунка 8 можно сказать, что процесс шлифования передней конической поверхности зуба протяжки представляет собой процесс внутреннего круглого врезного шлифования заготовки с диаметром отверстия  $d'' = 2r''$  шлифовальным кругом диаметром  $D'' = 2R''$ . Из рисунка 8, сечение Б-Б можно определить радиусы  $r''$  и  $R''$  как:  $r'' = d_2 / \sin \gamma$ ;  $R'' = D / 2 \sin(\delta - \gamma)$ .

При сближении задней поверхности шлифовального круга и заготовки, вследствие упругих отжатий, в технологической системе появляется осевое давление инструмента на поверхность заготовки и возникает упругопластический контакт. Под действием сил абразивные зерна внедряются в обрабатываемый материал до тех пор, пока упругие силы технологической системы не будут уравновешены суммарной нормальной реакцией [7]. Величина действующих сил определяет максимально возможную глубину микрорезания единичными абразивными зёрнами и геометрические параметры зоны контакта.

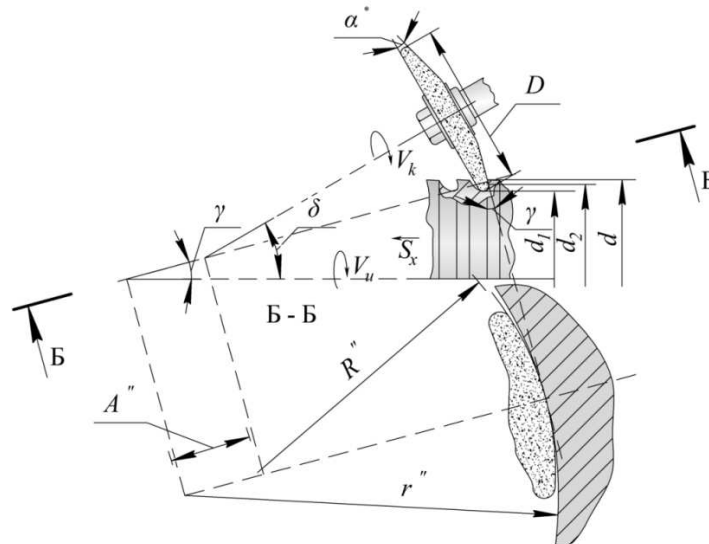


Рисунок 8 – Схема к расчету радиусов  $r''$  и  $R''$

Если бы материал при шлифовании не срезался и абразивный круг не изнашивался, то в плоскости, перпендикулярной образующей обрабатываемой поверхности, зона контакта для процесса круглого внутреннего врезного шлифования имела бы форму криволинейного двуугольника  $ABCD$ , (рисунок 9).

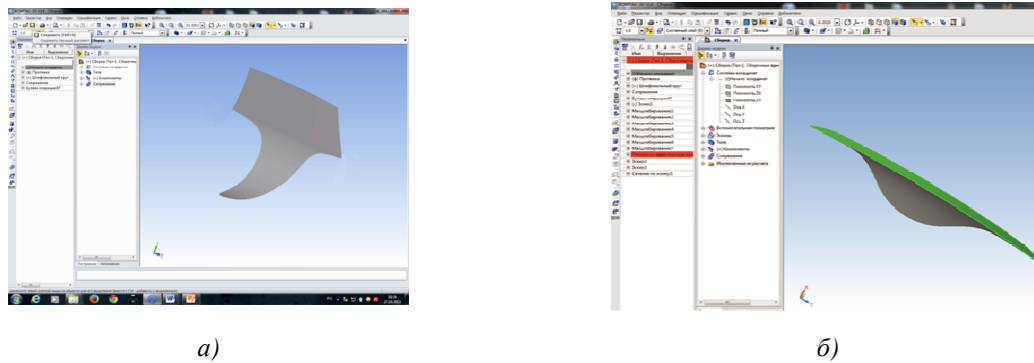


Рисунок 9 – Пример моделирования зоны контакта круга и заготовки при заточке зубьев протяжек: а) поверхность контакта круга и стружечной канавки; б) зона контакта.

При вращении заготовки обрабатываемая поверхность встречалась бы с абразивными зёрнами, наиболее удаленными от центра вращения круга, в точке  $A$ . Контакт материала с зёрнами прерывался бы в точке  $C$  (см. рисунок 8). Однако, вследствие наличия микрорезания после выхода из зоны контакта, радиус заготовки уменьшается на величину радиального съема материала  $\Delta r''$ . На поверхности остается слой шероховатости поверхности  $H$  (границная область материал-среда). Радиус круга в зоне контакта уменьшается на величину износа  $\Delta R_k''$ . Изменения размеров заготовки и круга приводят к изменению формы самой зоны. Обрабатываемая поверхность встречается с абразивными зёрнами, наиболее удаленными от центра его вращения, не в точке  $A$ , а в точке  $A'$ , процесс микрорезания заканчивается не в точке  $C$ , а в точке  $C'$ . С учетом радиального съема материала и износа круга, зона контакта будет иметь форму криволинейного двуугольника  $A'B'C'D'$ . С уменьшением радиального съема материала линия  $C'D'A$  приближается к линии  $CDA$ . Также как и в случае круглого наружного врезного шлифования форма зоны изменяется за счет возникновения упругих деформаций круга и заготовки. Под действием сил, возникающих при микрорезании, абразивные зёрна утапливаются в связку инструмента, линия, ограничивающая зону контакта со стороны материала, будет смещаться к центру вращения круга.

Так как положение линии  $A'D'C'$  зоны контакта определяется условиями выполнения процесса шлифования, то за начало отчета необходимо брать дугу  $ADC$ , которая соответствует траектории движения наиболее выступающих вершин исходной шероховатости. Положение линии  $A'D'C'$  вычисляется аналитически. Аналогично со стороны инструмента за начало отчета необходимо брать дугу  $ABC$ , координаты линии  $A'B'C'$  определяются также аналитически.

Значительное отличие в радиальном съеме материала и радиальном износе круга позволяют при анализе закономерностей удаления материала совмещать точку  $A'$  с точкой  $A$  и точку  $B'$  с точкой  $B$ . Если принять в качестве допущения незначительность влияния на размеры зоны температурных и упругих деформаций материалов круга и заготовки, то максимально возможная глубина микрорезания при заточке зуба протяжки  $t_{fx}$  вычисляется как  $t_{fx} = H + \Delta r''$ .

При движении вершины зёрна в зоне от точки  $C$  (см. рисунок 10) максимальная глубина резания увеличивается, становится максимальной, а затем начинает уменьшаться. Текущее значение глубины микрорезания  $t(z)_x$  зависит от радиус-векторов заготовки  $r''$ , круга  $R''$ , угла наклона оси круга  $\delta$  и межцентрового расстояния  $A''$ . Для наиболее выступающих зёрен оно может быть определено по уравнению  $t(z)_x = R'' \cos \lambda_1 - r'' \cos \phi_1 + A''$ , где  $\lambda_1$  – угол между радиус-вектором поверхности круга и основной плоскостью;  $\phi_1$  – угол между радиус-вектором поверхности заготовки и основной плоскостью.

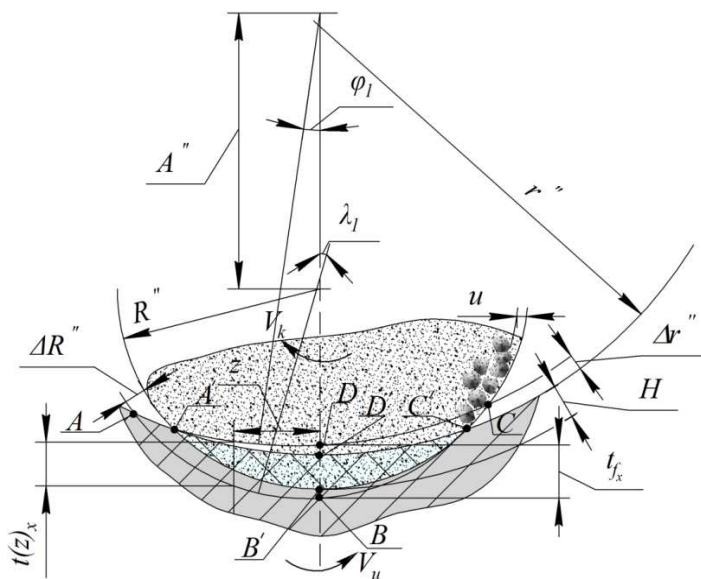


Рисунок 10 – Схема - зоны контакта заготовки с конической поверхностью тарельчатого шлифовального круга при круглом внутреннем шлифовании при расположении оси круга под углом к оси заготовки в одной плоскости

Принимая во внимание, что  $\cos \phi_1 = \sqrt{1 - \sin^2 \phi_1}$ ;  $\cos \lambda_1 = \sqrt{1 - \frac{(r_1'')^2}{R^2} \sin^2 \phi_1}$ ;  $\sin \phi_1 \approx \frac{z}{r''}$ ;

$A'' = R + r'' - t_{fx}$  после преобразований получим

$$t(z)_x = R'' \sqrt{1 - \left(\frac{z}{R''}\right)^2} - r'' \sqrt{1 - \left(\frac{z}{r''}\right)^2} - (R'' - r'' - t_{fx}), \quad (7)$$

Так как для реальных процессов шлифования величина  $z$  в пределах зоны контакта более чем на порядок меньше  $R''$  и  $r''$ , подкоренные выражения уравнения (7) могут быть представлены в виде степенных рядов (см. зависимость 4).

$$\sqrt{1 - \left(\frac{z}{R''}\right)^2} \cong 1 - \frac{z^2}{2(R'')^2}; \quad \sqrt{1 - \left(\frac{z}{r''}\right)^2} \cong 1 - \frac{z^2}{2(r'')^2} \quad (8)$$

Заменив в уравнении (8) радиусы круга и заготовки на соответствующие диаметры  $D''$  и  $d''$  зависимость (7) будет иметь вид:

$$t(z)_x = t_{fx} + \frac{z^2}{D_e} \quad (9)$$

где  $D_e$  – эквивалентный диаметр,  $D_e = \frac{Dd_2}{D \sin \gamma - d_2 \sin(\delta - \gamma)}$  (10).

На рисунке 11 показана зависимость эквивалентного диаметра абразивного инструмента от переднего угла зуба протяжки, расчет выполнен для значений  $D = 54 \text{ мм}$ ,  $d_1 = 20 \text{ мм}$ .

Полученные формулы (6) (10) позволяют уточнить зависимости [10], дающие возможность рассчитать величину износа зерен шлифовального круга.

Ширина профиля вершины зерна на уровне  $y$ , вычислится по уравнению:

– при шлифовании стружечной канавки

$$b_g = C_b h^m = C_b [t(z) - y - u]^m = C_b \left( t_f - y - u - \frac{z^2 (D \cos \delta + d_1)}{D d_1 \cos \delta} \right)^m; \quad (11)$$

– при заточке зуба протяжки

$$b_g = C_b h^m = C_b [t(z) - y - u]^m = C_b \left( t_f - y - u - \frac{z^2 [(D \sin \gamma - d_2 \sin(\delta - \gamma))]}{D d_2} \right)^m \quad (12)$$

где  $C_b; m$  – коэффициент пропорциональности и показатель степенной зависимости;  $h$  – расстояние от вершины зерна до рассматриваемого уровня.

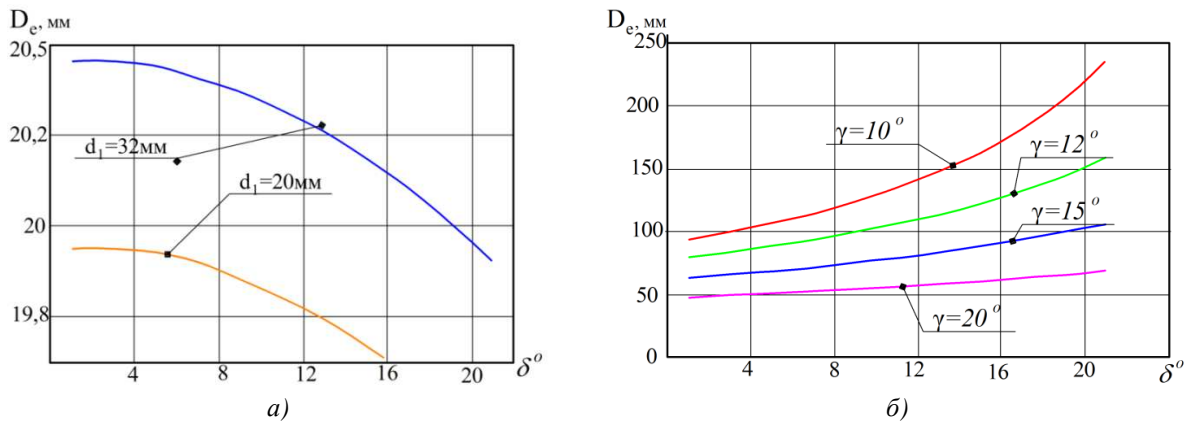


Рисунок 11 – Зависимость эквивалентного диаметра абразивного инструмента от переднего угла зуба протяжки: а) для случая шлифования стружечных канавок; б) для случая заточки зубьев.

Вероятность контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом может быть рассчитана: – при шлифовании стружечной канавки

$$P_k = P(\bar{M}) = \exp \left\{ - \frac{\pi K_c n_g (V_k + V_u) \sqrt{2 \rho_g}}{V_u H_u^{3/2}} \cdot \left[ \frac{2}{5} (D d_1 \cos \delta / (D \cos \delta + d)) \right]^{1/2} \cdot \sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i \Delta r)^{5/2} + \frac{3}{8} (t_f - y_j - \Delta r)^2 \left( z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right\} \quad (13)$$

– при заточке зуба протяжки

$$P_k = P(\bar{M}) = \exp \left\{ - \frac{\pi K_c n_g (V_k - V_u) \sqrt{2 \rho_g}}{V_u H_u^{3/2}} \cdot \left[ \frac{2}{5} (D d_2 / (D \sin \gamma - d_2 \sin(\delta - \gamma))) \right]^{1/2} \cdot \sum_{i=2}^n (t_f - y_j - i \Delta r)^{5/2} + \frac{3}{8} (t_f - y_j - \Delta r)^2 \left( z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right\} \quad (14)$$

Радиальный съем металла  $\Delta r$ : для условий шлифования стружечной канавки

$$\Delta r = \frac{K_c t_f^2 n_g (V_k + V_u) \cdot (\rho_g D d_1 \cos \delta / (D \cos \delta + d_1))^{1/2}}{13,66 V_u + 1,478 K_c t_f n_g (V_k + V_u) \cdot (\rho_g D d_1 \cos \delta / (D \cos \delta + d_1))^{1/2}}, \quad (15)$$

при заточке зуба протяжки

$$\Delta r = \frac{K_c t_f^2 n_g (V_k - V_u) \cdot (\rho_g D d_2 \cos \delta / (D \sin \gamma - d_2 \sin(\delta - \gamma)))^{1/2}}{13,66 V_u + 1,478 K_c t_f n_g (V_k - V_u) \cdot (\rho_g D d_2 \cos \delta / (D \sin \gamma - d_2 \sin(\delta - \gamma)))^{1/2}}. \quad (16)$$

На рисунках 12, 13, 14 приведены результаты расчетов вероятности контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом образцов, длины пути резания ( $L_{pez} = \int_{-L_g}^{L_g} P_k dz$ ) и глубины микрорезания

( $t(z) = t_f - z^2/D_e$ ,  $t(z)_x = t_{f_x} + z^2/D_e$ ) для случая обработки закаленной стали Р6М5 диаметром 36 мм кругом 12 60x32x74AF54M7V при  $V_k = 35 м/с$ ,  $V_u = 0.2 м/с$ .



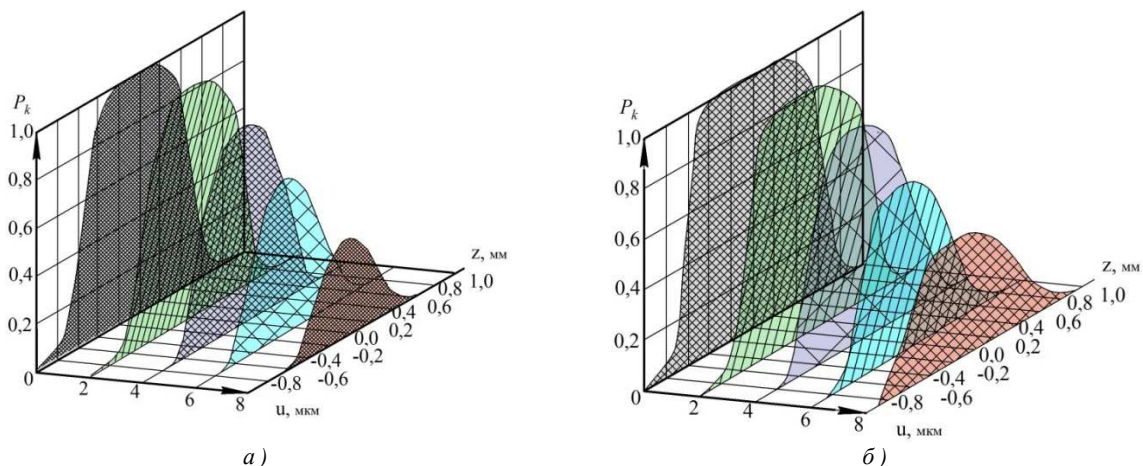


Рисунок 12 – Вероятность контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом: а) для условий шлифования стружечной канавки; б) при заточке зуба протяжки

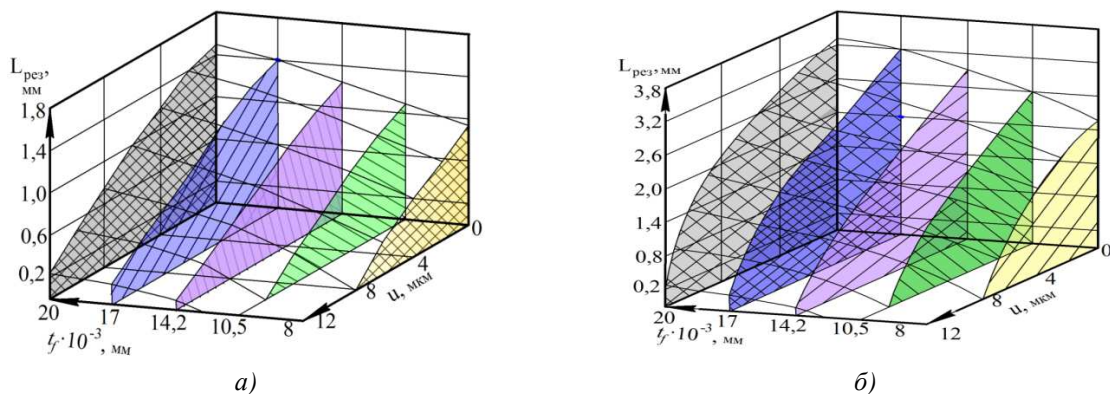


Рисунок 13 – Длина пути резания: а) для схемы шлифования стружечной канавки; б) для схемы заточки протяжки

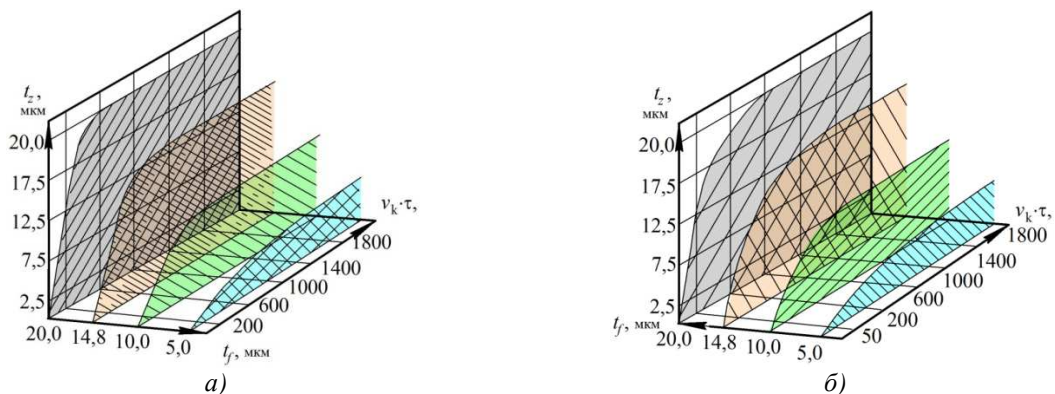


Рисунок 14 – Влияние числа контактов круга с деталью на глубину микрорезания абразивным зерном при шлифовании закаленной стали а) для схемы шлифования стружечной канавки; б) для схемы заточки протяжки

Анализ рисунков 12 – 14 показывает, что вероятность контакта наиболее удаленного от центра круга абразивного зерна с материалом при движении от точки входа в зону к основной плоскости увеличивается, а при движении от основной плоскости к точке выхода снижается от единицы до нуля. Длина пути резания, с увеличением числа контактов поверхности инструмента с обрабатываемой деталью увеличивается. С увеличением глубины микрорезания абразивное зерно все дальше проникает в зону резания, увеличивается вероятность его контакта с обрабатываемым материалом и длина пути резания.

**Выводы.** Выполненный анализ позволил разработать математические модели процесса шлифования и заточки зубьев протяжек, определить форму зоны контакта, которая при шлифовании стружечных канавок представляет собой поверхность в виде двух криволинейных сегментов, а при

заточке криволинейный двуугольник, получены аналитические выражения для расчёта эквивалентного диаметра. Полученные математические зависимости позволяют определять текущее значение глубины микрорезания, и могут быть использованы при расчетах параметров процессов шлифования и заточки зубьев протяжек.

Полученные математические модели не учитывают процессы неравномерного износа абразивного инструмента и колебательные процессы в зоне контакта, что представляет собой перспективы дальнейших исследований в данной области.

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Васенко С.М. Применение шлифовальных кругов из микрокристаллического корунда для шлифования фасонного режущего инструмента/ С.М.Васенко, В.К.Старков// Вестник МГТУ «Станкин», № 1 (19), Том. 2. 2012. С47-49.
2. Палей М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента/М.М.Палей, Л.Г.Дибнер, М.Д.Флид. – М.: Машиностроение, 1988.– 288с.
3. Брозголь И.М. Влияние микрогеометрии поверхности и метода окончательной обработки дорожек качения на долговечность шариковых подшипников / И.М. Брозголь // Технология подшипникоостроения. – М., 1958. – Вып. 17.
4. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
5. Бокучава Г.В. Износ и стойкость абразивного инструмента: автореф. дис. д-ра техн. наук. – Тбилиси, 1967. – 46 с.
6. Щеголев В.А. Эластичные абразивные и алмазные инструменты / В.А. Щеголев, М.Е. Уланова. – Л.: Машиностроение, 1977. – 148 с.
7. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке /Ю.К.Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304с.
8. Богущкий В.Б. Системный анализ операции чистового шлифования / В.Б. Богущкий, С.М.Братан, Ю.К. Новоселов/ Вестник СевНТУ: сб. наук. тр. Вып. 139/2013. Серия: Машиноприладобудування та транспорт. — Севастополь, 2013.С.13-21.
9. Principles of modern grinding technology /W. Brian Rowe/ – Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 2009. – 421р.
10. Новоселов Ю.К. Анализ связи износа инструмента с износом абразивных зерен / Ю.К. Новоселов, В.Б. Богущкий/ Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 81. – С.228-237.

*Поступила в редакцию 23.01.2014 г.*

#### **Богущкий В.Б., Братан С.М., Ярошенко О.О. Моделивання процесів шліфування і заточування поверхонь зубів протяжок**

Проведено аналіз зони контакту шліфувального круга з заготовкою в умовах, коли вісь обертання кола розташована під деяким кутом до осі обертання заготовки. Виконаний аналіз зон контакту при наявності кута схрещування осей круга і заготовки для випадків шліфування периферією і бічною поверхнею круга на прикладі операції шліфування і заточування зубів протяжки. Отримані математичні залежності дозволяють визначити поточне значення глибини микрорезання і можуть бути використані при розрахунках величини розмірного зносу шліфувальних кругів.

**Ключові слова:** шліфування, зона контакту, абразивне зерно, еквівалентний діаметр, микрорізнання, знімання матеріалу.

#### **Bogutsky V.B., Bratan S.M., Yaroshenko A.A. Modeling of processes of grinding and sharpening surfaces of teeth broaches**

Analysis of the contact zone of the grinding wheel with the workpiece in the conditions when the axis of rotation of the circle is at an angle to the axis of rotation of the workpiece. The analysis of the contact zones in the presence of the angle of crossing axes of the circle and blanks for grinding the peripheral and the lateral surface of a circle on the example of the operation of grinding and sharpening of teeth's pullback. The obtained mathematical dependences allowing to determine the current value of the depth of microtune and can be used when calculating the value of the size of wear of grinding wheels.

**Keywords:** grinding, zone contact, abrasive grain, equivalent diameter, microcutting, removal of material.